

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Systemy s uzemňováním fáze se zemní poruchou

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal MAJER**
Osobní číslo: **E11B0329P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Systemy s uzemňováním fáze se zemní poruchou**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Bakalářská práce "Systemy s uzemňováním fáze se zemní poruchou" bude zaměřena na tyto body:

1. Uveďte problémy s provozem rozsáhlých distribučních sítí.
2. Stanovte a zhodnoťte bezpečnost provozu distribučních sítí.
3. Popište základní informace o bezpečnosti systému uzemňování fáze se zemní poruchou.
4. Na konkrétním případě rozeberte a uveďte přínos uzemňování fáze se zemní poruchou ke zvýšení bezpečnosti provozu distribučních sítí.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

1. Skripta k předmětu Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie, Elektroenergetika I, II.
2. Přednášky a podklady k povinným předmětům bakalářského studia.
3. Internetové podklady.
4. Dle uvážení a pokynů udá konzultant.

Vedoucí bakalářské práce: Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2013
Termín odevzdání bakalářské práce: 9. června 2014


Doc. Ing. Jiří Hařmířbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kís, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Anotace

Tato bakalářská práce se v první kapitole zabývá definováním distribuční soustavy ČR a jejího rozdělení podle napěťových hladin. V druhé kapitole se zabývá zejména napěťovými a proudovými poměry při zemním spojení s ohledem na způsob uzemnění uzlu transformátoru. V třetí kapitole se snaží přiblížit způsoby vyhledávání zemního spojení zejména pomocí Wattmetrické metody, Švédské neutrály a metody Shuntování. V poslední kapitole ukazuje na případu rozsáhlé kabelové sítě příznivé účinky metody Shuntování při trvalém zemním spojení.

Klíčová slova

Distribuční soustava, zemní spojení, izolovaná soustava, kompenzovaná soustava, shuntování (šentování), přizemnění postižené fáze.

Abstract

This bachelor thesis in the first chapter deals with definition of the Czech Republic distribution system and its division of according to voltage levels. The second chapter deals mainly with voltage and current situation in the earth faults with the point of view of the transformer grounding. In the third chapter tries to approach how to search earth fault by Powermeter method, Swedish neutral and method of Shunt. In the last chapter shows the positive effect method of Shun on the example of large cable network in continuous earth fault.

Key words

Distribution system, earth fault, isolated system, compensated system, shunt, earthing of affected phase.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne

.....

Michal Majer

Poděkování

Tímto bych chtěl velice poděkovat mé vedoucí Doc. Ing. Lucii Noháčové, Ph.D. za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat mému konzultantovi Ing. Františkovi Žákovi za poskytnutý čas a konzultaci.

Seznam použitých zkratek a značek

Zkratka	Popis	
vvv	velmi vysoké napětí	
vn	vysoké napětí	
nn	nízké napětí	
ČSN	česká technická norma	
EN	evropská norma	
Značka	Popis	Jednotka
\bar{I}_p	fázor poruchového proud	(A)
\bar{I}_a	fázor proudu ve fázi a	(A)
\bar{I}_b	fázor proudu ve fázi b	(A)
\bar{I}_c	fázor proudu ve fázi c	(A)
\bar{I}_L	fázor kompenzačního proudu tlumivkou	(A)
\bar{I}_R	fázor jmenovitého proudu uzlového rezistoru	(A)
\bar{U}_0	fázor napětí uzlu proti zemi	(V)
\bar{U}_a	fázor napětí fáze a proti zemi	(V)
\bar{U}_b	fázor napětí fáze b proti zemi	(V)
\bar{U}_c	fázor napětí fáze c proti zemi	(V)
\bar{U}_{fa}	fázor fázového napětí a	(V)
\bar{U}_{fb}	fázor fázového napětí b	(V)
\bar{U}_{fc}	fázor fázového napětí c	(V)

U_f	fázové napětí	(V)
U_S	sdružené napětí sítě	(V)
ω	úhlová rychlost omega	(rad)
C_a	kapacita fáze a proti zemi	(F)
C_b	kapacita fáze b proti zemi	(F)
C_c	kapacita fáze c proti zemi	(F)
R	činný odpor	(Ω)
R_P	činný odpor poruchy	(Ω)
R_{sh}	činný odpor shuntu	(Ω)
R_L	činný odpor tlumivky	(Ω)
e	eulerovo číslo	(-)
L	indukčnost	(H)
G_0	svodový odpor jedné fáze vedení	(S)
X	reaktance	(Ω)
Z	impedance	(Ω)
Z_V	impedance vedení	(Ω)
P_{max}	maximální činný výkon sítě	(W)
$P_{stř}$	střední činný výkon sítě	(W)
I_{max}	maximální proud sítě	(A)
$I_{stř}$	střední proud sítě	(A)
$\Delta U\%_{max}$	úbytek napětí v procentech při maximálním výkonu	(%)
$\Delta U\%_{stř}$	úbytek napětí v procentech při středním výkonu	(%)

ΔU_{\max}	úbytek napětí ve voltech při maximálním výkonu	(V)
$\Delta U_{\text{stř}}$	úbytek napětí ve voltech při středním výkonu	(V)
U_{dot}	dotykové napětí v místě poruchy	(V)
$U_{\text{dot sh}}$	dotykové napětí v rozvodně	(V)
I_p	kapacitní proud sítě	(A)
I_{zbyt}	zbytkový proud zemního spojení	(A)
I_{sh}	zbytkový proud zemního spojení v rozvodně	(A)
I_{por}	zbytkový proud zemního spojení v místě poruchy	(A)

Obsah

1	Problémy s provozem rozsáhlých distribučních sítí	12
1.1	Srovnání venkovního a kabelového vedení	13
1.1.1	Venkovní vedení	13
1.1.2	Kabelové vedení	13
2	Bezpečnost provozu distribučních sítí	13
2.1.1	Nebezpečné dotykové a krokové napětí	13
2.2	Zemní spojení v izolovaných soustavách	14
2.2.1	Kovové zemní spojení v izolovaných soustavách	14
2.2.2	Nekovové zemní spojení v izolovaných soustavách	16
2.3	Zemní spojení v kompenzovaných soustavách	17
2.4	Zemní spojení v soustavě uzemněné přes odporník	19
3	Metody vyhledávání zemního spojení	21
3.1	Aktivní metody	21
3.2	Pasivní metody	22
3.2.2	Pasivní metody pracujících s ustáleným stavem	23
3.2.3	Pasivní metody pracujících s přechodovým dějem	24
3.3	Švédská neutrála	25
3.4	System přizemnění postižené fáze (Shuntování)	26
3.4.1	Popis funkce Shuntování	26
3.5	Ochrany	27
3.6	Automatika opětného zapínání	28

4	Konkrétní případ zemního spojení s přizemněnou fází	29
4.1	Zadání konkrétního případu zemního spojení	30
4.2	Vypočtené parametry sítě	30
4.3	Omezení proudu poruchou pomocí shuntování	32
4.4	Dotykové napětí bez přizemnění postižené fáze	35
5	Závěr	36
6	Použitá literatura	38

1 Problémy s provozem rozsáhlých distribučních sítí

V České republice se elektrická soustava dělí na přenosovou a distribuční. Přenosová soustava zahrnuje veškeré vedení a zařízení pro napěťové hladiny 400 kV, 220 kV a některá vybraná důležitá vedení a zařízení pro 110 kV. Přenosová soustava má na starosti přenos elektrické energie z velkých elektráren na velké rozvodny. Od těchto velkých rozvodů až po konečného odběratele se jedná již o soustavu distribuční.

Napěťové úrovně distribuční soustavy jsou: vybraná vedení a zařízení vysokého napětí 110 kV

soustavy vysokého napětí 35 kV, 22 kV, 10 kV, 6 kV, 3 kV

a soustava nízkého napětí 0,69 kV, 0,4 kV

Vzhledem k mému zadání se dále budu nejvíce věnovat distribuční soustavě vysokého napětí. Tato soustava je provozována v drtivé většině paprskově a je tvořena venkovním nebo kabelovým vedením. Provozovatelé distribučních soustav se snaží přejít na napěťové úrovně 35 kV a 22 kV. Napěťové úrovně 10 kV, 6 kV a 3 kV se v distribučních soustavách používají v průmyslových rozvodech. Možnost provozu distribučních sítí se odvíjí od volby systému uzemnění uzlu transformátoru. Volba systému uzemnění se v symetrické síti prakticky neprojeví pokud nedojde k poruše. Při poruše se již každý systém chová jinak. Systémy se vybírají podle požadavků na bezpečnost, spolehlivost dodávky, dimenzování a chránění.

Napěťová úroveň	Jmenovité napětí	Uspořádání rozvodu	Provoz uzlu transformátoru
vvn	110 kV	Okružní, paprskový	Účinně uzemněný
vn	35 kV, 22 kV	Průběžný, paprskový, dvojpaprskový (obvykle s možností spojení do okružního)	Neúčinně uzemněný - většinou kompenzovaný
	10 kV		Neúčinně uzemněný, nebo izolovaný
	6 kV		
nn	0,69 kV	Průběžný, paprskový, mřížová síť	Účinně uzemněný s vyvedeným středním vodičem
	0,4 kV		

Tab. 1.1: Principiální řešení sítí jednotlivých napěťových úrovní [2]

1.1 Srovnání venkovního a kabelového vedení

1.1.1 Venkovní vedení

Venkovní vedení se provádí pomocí stožárů, izolátorů a holých vodičů. Je levnější než kabelové vedení a čím je vyšší hladina napětí, tím je rozdíl ceny větší. Venkovní vedení má menší hodnoty kapacit, ale reaktance, úbytek na vedení a jalové ztráty jsou u venkovního vedení větší než u kabelového. Venkovní vedení požaduje větší prostor na realizaci a je poruchovější. Poruchy jsou převážně jen přechodného charakteru (spadá větev, porušení izolace v důsledku atmosférických vlivů atd.) a vyhledávání poruch je také jednodušší.

1.1.2 Kabelové vedení

Kabelové vedení je dražší než venkovní vedení a provádí se jako jednožilové či vícežilové. Kabelové vedení má výrazně vyšší hodnoty kapacit (okolo 30ti násobku), ale hodnoty reaktance, úbytku na vedení a jalové ztráty jsou menší. Jejich poruchovost je výrazně menší než u venkovních vedení, ale hůře se hledá porucha a jsou většinou trvalého charakteru (překopnutí kabelu, vícefázový zkrat, atd.)

2 Bezpečnost provozu distribučních sítí

V bezpečnosti provozu distribučních sítí hraje roli hlavně plynulost dodávky elektrické energie. Nejčastěji k přerušení dodávky v sítích vn dochází díky zemnímu spojení. Zemní spojení může být kovové (hodnota odporu zemního spojení je zanedbatelná), či nekovové (hodnota odporu zemního spojení je několik set ohmů) a může být mžikové (do 0,5 s), krátkodobé (do 5 minut), přerušované (opakující se mžikové nebo krátkodobé zemní spojení) a nebo trvalé (trvajícím až do odstranění závady, několik hodin). Závažnost těchto poruch se liší podle typu soustavy, proto zde uvedu napěťové a proudové poměry při poruše v různých typech soustav.

2.1.1 Nebezpečné dotykové a krokové napětí

Důležitým stanoviskem v bezpečnosti provozu distribučních sítí je také dotykové a krokové napětí, které vznikne při zemním spojení. Dotykovým napětím se rozumí napětí, které vznikne na lidském těle při dotyku dvou částí elektrického obvodu nebo míst s rozdílným potenciálem. Krokové napětí je zvláštní případ dotykového napětí, které vznikne při dotyku míst s rozdílným potenciálem lidským krokem.

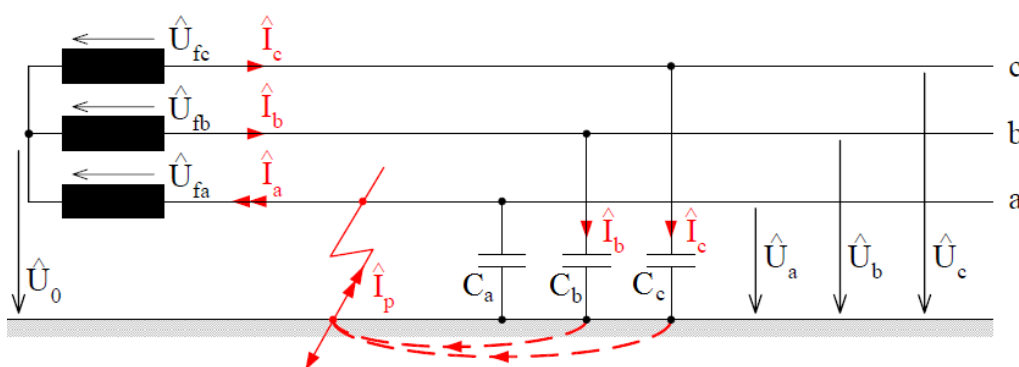
Velikost těchto nebezpečných napětí a místa kde je nutnost jejich velikost ověřovat řeší normy ČSN EN 61936-1 a ČSN EN 50522. Dovolené dotykové napětí je závislé na čase. Maximální dovolené dotykové napětí pro čas větší než 10 s je 80 V. V případě že místo zemního spojení vyhovuje dle dovoleného dotykového napětí lze předpokládat, že vyhovuje i na nebezpečné krokové napětí. Místa kde se musí velikost nebezpečného dotykového napětí ověřovat jsou děleny podle odlehlosti místa a častosti výskytu osob či zvířat. A také se velikost dovoleného napětí liší, pokud se předpokládá nějaký přidaný odpor (například pokud jsou osoby obuté). Poté může být dovolené dotykové napětí až 150 V. Velikost dotykového napětí může být také vyšší pokud je vedení při výskytu zemní poruchy odpojeno.

2.2 Zemní spojení v izolovaných soustavách

Soustava může být provozována jako soustava izolovaná pokud kapacitní proud při poruše nedosahuje 10 A. Velikost poruchového proudu závisí na napěťové hladině a hlavně na rozsáhlosti sítě. U kabelových vedení navíc ještě na konstrukci, typu izolace a průřezu. Z tohoto důvodu se jako izolované soustavy provozují méně rozsáhlé sítě, např. sítě průmyslových rozvodů.

Izolovanou sít lze provozovat i při poruše bez přerušení dodávky. Takto dočasně provozovaná sít je ale zatížena vyššími napětími a hrozí, že zemní spojení přeroste v závažnější poruchu.

2.2.1 Kovové zemní spojení v izolovaných soustavách



Obr. 1: Kovové zemní spojení [4]

Při nekovovém zemním spojení proudové a napěťové poměry vycházejí z těchto vztahů:

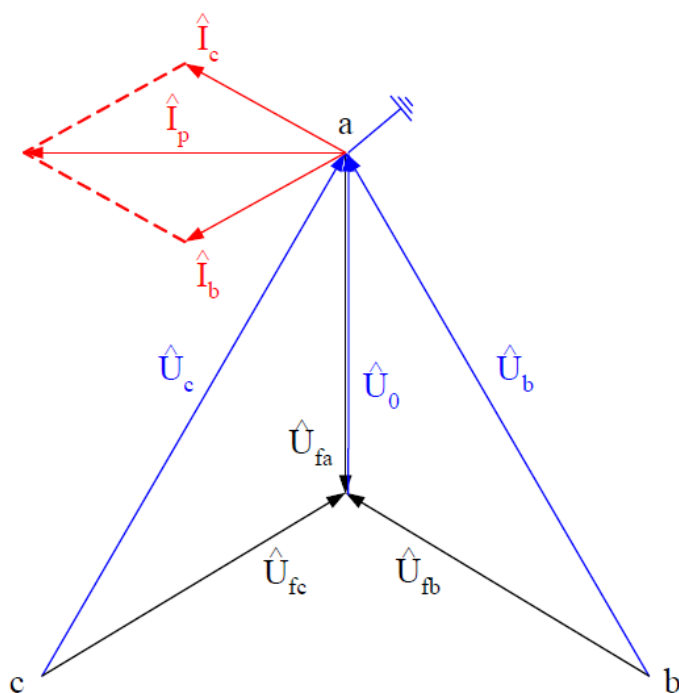
$$\bar{I}_p = \bar{I}_b + \bar{I}_c = j\omega C_b \bar{U}_b + j\omega C_c \bar{U}_c = -3j\omega C_0 \bar{U}_{fa} \tag{1}$$

$$\bar{U}_b = \bar{U}_0 + \bar{U}_{fb} = -\sqrt{3}e^{j30}\bar{U}_{fa} \quad (2)$$

$$\bar{U}_a = 0 \quad (3)$$

$$\bar{U}_0 = -\bar{U}_{fa} \quad (4)$$

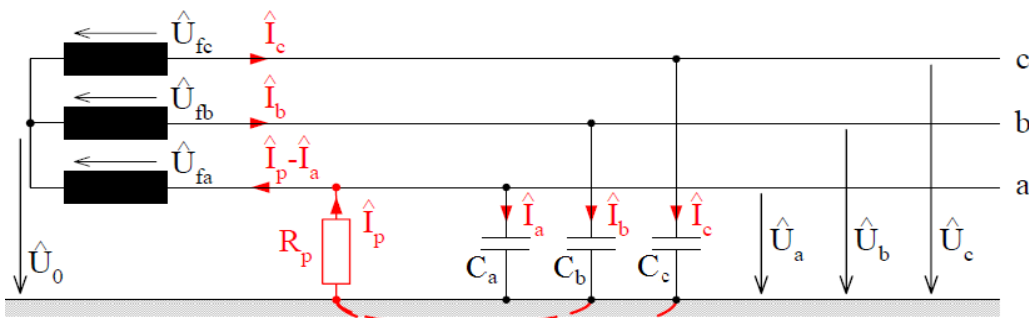
- (1) Hodnota kapacitní proudu při poruše. [4]
- (2) Hodnota napětí proti zemi na zdravých fázích. [4]
- (3) Hodnota napětí proti zemi na porušené fázi. [4]
- (4) Hodnota napětí uzlu proti zemi. [4]



Obr.2: Fázorový diagram proudových a napěťových poměrů [4]

Z udaných vztahů tedy vyplývá, že fázová napětí se při kovovém zemním spojení zvětší na hodnotu napětí sdružených. Napětí uzlu vůči zemi vzroste na hodnotu fázového napětí před poruchou. A poruchový proud je součtem kapacitních proudů nepostižených fází.

2.2.2 Nekovové zemní spojení v izolovaných soustavách



Obr. 3: Nekovové zemní spojení [4]

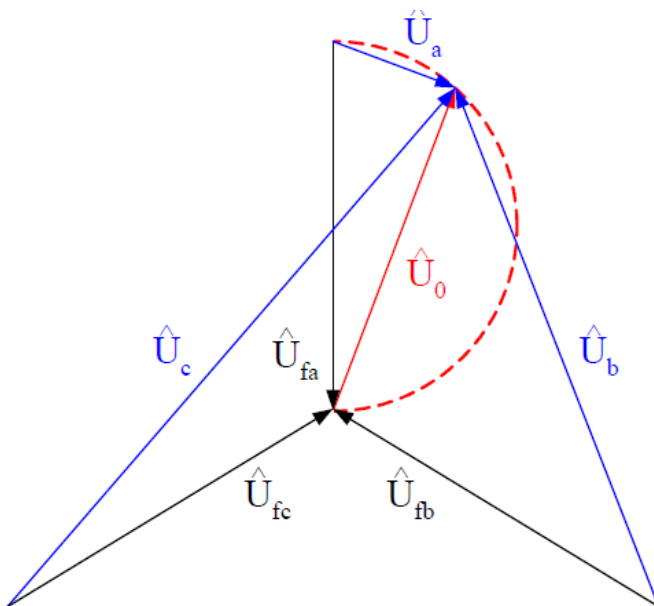
U nekovového zemního spojení se musí vzít v potaz odpor mezi postiženou fází a zemí, ten se pohybuje v hodnotách stovek ohmů. Napěťové a proudové poměry pak vycházejí z těchto vztahů.

$$\bar{I}_p = \bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c = j\omega(C_a\bar{U}_a + C_b\bar{U}_b + C_c\bar{U}_c) = 3j\omega C_0\bar{U}_0 = -3j\omega C_0\bar{U}_0 \frac{R_p^{-1}}{3j\omega C_0 + R_p^{-1}} \quad (5)$$

$$\bar{U}_0 = f(R_p) = - \frac{j\omega(C_a + \bar{a}^2 C_b + \bar{a} C_c) + R_p^{-1}}{j\omega(C_a + C_b + C_c) + R_p^{-1}} \bar{U}_{fa} \quad (6)$$

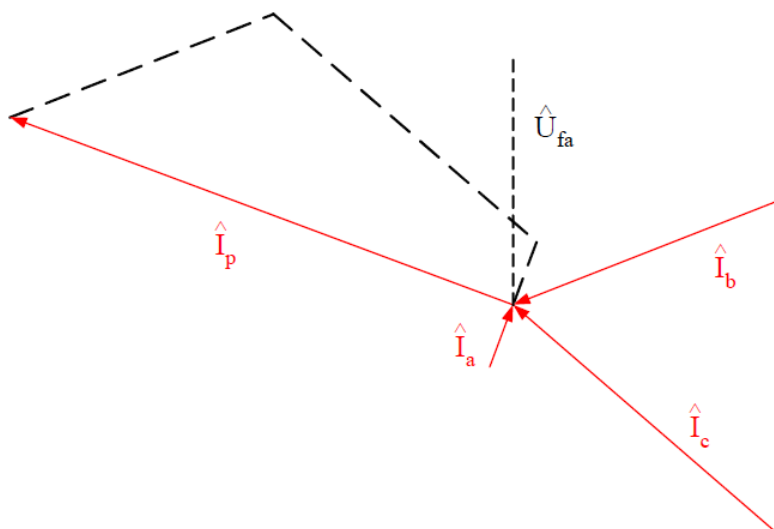
(5) Hodnota poruchového proudu při nekovovém zemním spojení. [4]

(6) Hodnota napětí uzlu proti zemi při nekovovém zemním spojení. [4]



Obr. 4: Fázorový diagram napětí při nekovové zemní spojení [4]

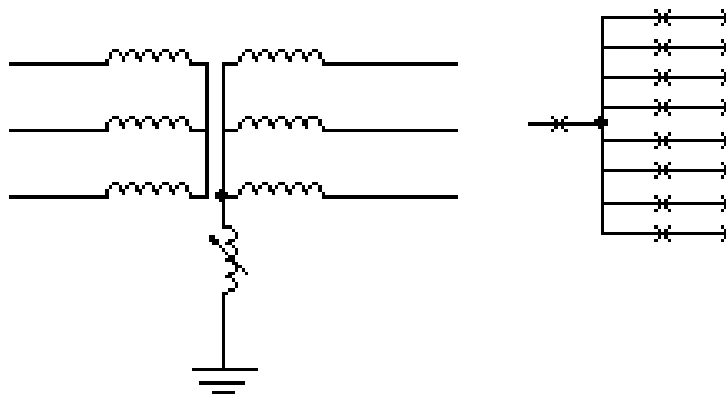
Podle hodnoty odporu poruchy se mění napětí uzlu, při některých hodnotách odporu může napětí na zdravých fázích překročit hodnotu sduženého napětí (viz Obr. 4). A poruchový proud je součtem všech kapacitních proudů (viz Obr. 5).



Obr. 5: : Fázorový diagram proudů při nekovové zemní spojení [4]

2.3 Zemní spojení v kompenzovaných soustavách

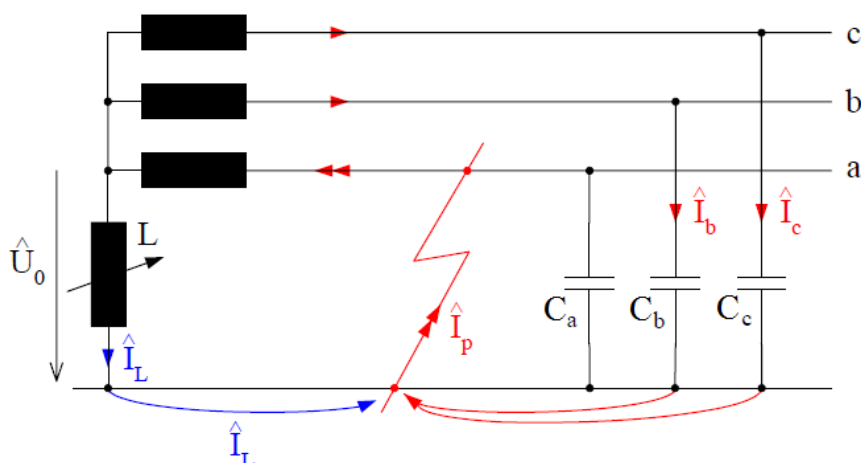
U rozsáhlejších sítí venkovního vedení, kde kapacitní proud při poruše dosahuje hodnoty více než 10 A musí být tento proud kompenzován. Doporučení kompenzace kapacitního proudu je již od 5 A. Proto se v těchto případech uzel transformátoru uzemňuje přes zhášející tlumivku. Tato tlumivka je regulovatelná a její hodnota závisí na rozsáhlosti sítě. Tlumivky se dříve ladily pomocí odboček, dnes již pomocí změny magnetického obvodu dálkově, buď samočinně nebo ručně. Tlumivka se potřebuje přeladit pokud dojde ke změně kapacity sítě důsledkem připojení nebo odpojení nějakého z vedení. Kompenzace kapacitních proudů blíže řeší norma ČSN EN 333070.



Obr. 6: Zapojení zhášející tlumivky a znázornění možných připojovaných vedení [1]

Tlumivka snižuje velikost poruchového proudu tím, že kompenzuje kapacitní poruchový proud a tím sníží výsledný poruchový proud na 10 % až 3 % původní hodnoty. Tento zbytkový poruchový proud je převážně činného charakteru.

Zapojení uzlu transformátoru přes zhášející tlumivku umožňuje provozovat síť i při zemním spojení bez ovlivnění spolehlivosti dodávky, dokud se nevyhledá a neodstraní porucha. Po tuto dobu však hrozí, že zemní porucha přeroste do závažnějšího problému, jako například vícefázový či mezifázový zkrat.



Obr. 7: Zemní spojení v kompenzované soustavě[4]

Proudové a napěťové poměry při poruše vycházejí z těchto vztahů:

$$\bar{I}_L = -j \frac{\bar{U}_0}{\omega L} \quad (7)$$

$$\bar{I}_p = -\bar{I}_L \quad (8)$$

$$\bar{U}_0 = -\bar{U}_{fa} \quad (9)$$

(7) Hodnota indukčního proudu tlumivky. [4]

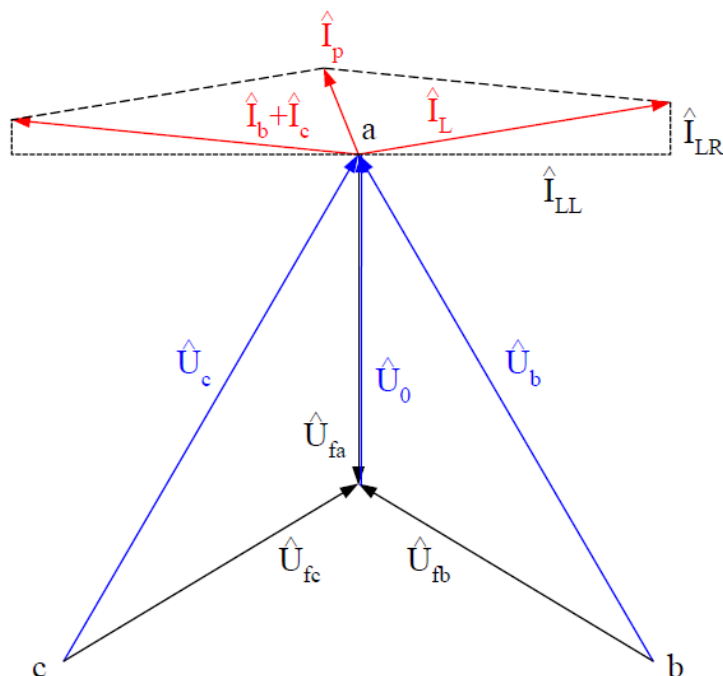
(8) Hodnota poruchového proudu při úplné kompenzaci. [4]

(9) Hodnota napětí uzlu proti zemi. [4]

Při bezporuchovém stavu kompenzované sítě je hodnota napětí uzlu proti zemi blízká nule (obvykle $\bar{U}_0 < 0,01 V$). Když dojde k poruše hodnota napětí uzlu proti zemi vzroste na hodnotu fázového napětí. Od tlumivky k místu poruchy začne protékat induktivního proud, který je fázově otočen o 180° vůči poruchovému proudu. Výsledný poruchový proud pak vychází z tohoto vztahu:

$$\bar{I}_p = \left[\frac{1}{R_L} + 3G_0 + j(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}) \right] \bar{U}_0 \quad (10)$$

(10) Hodnota poruchového proudu. (Kde R_L je činný odpor tlumivky a G_0 je svodový odpor jedné fáze) [4]

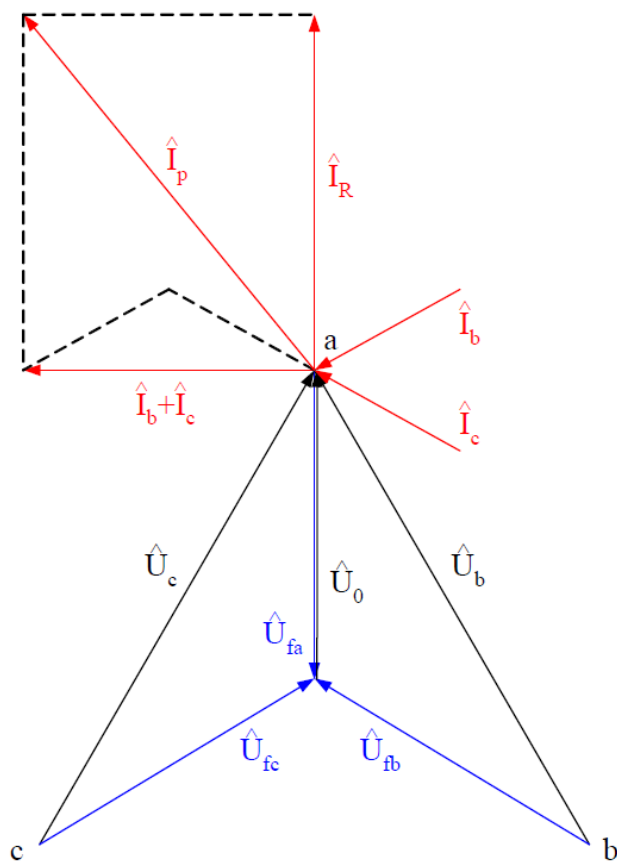


Obr. 8: Fázorový diagram napěťových a proudových poměrů při zemním spojení [4]

Z fázorového diagramu je patrné, že výsledný poruchový proud je při správném nastavení tlumivky výrazně menší než bez kompenzace. V sítích s velkou kapacitní nesymetrií a malou rezistivitou však může dojít při správném nastavení tlumivky k velkým napětím na uzlu transformátoru. Proto se v takových případech k tlumivce zapojuje paralelně odporník, který sice zvýší poruchový proud, ale sníží napětí na uzlu transformátoru. Pokud je tento zbytkový poruchový proud menší než 5 A, oblouk samovolně zhasne. Takto zapojená tlumivka se nazývá dizonanční tlumivka.

2.4 Zemní spojení v soustavě uzemněné přes odporník

Díky velké kapacitní symetrii kabelových vedení je nemožné naladit zhášející tlumivku. Proto se uzel transformátoru těchto vedení uzemňuje přes odporník. Uzemnění přes odporník se tedy používá většinou u kabelových vedení nebo u sítí s velkým poměrem kabelových vedení. Tento typ uzemnění je nutné použít pokud je poruchový proud větší než 350 A. Omezení poruchového proudu je závislé



Obr. 10: Fázorový diagram proudových a napěťových poměrů při poruše v blízkosti transformátoru [4]

3 Metody vyhledávání zemního spojení

Důležité pro bezpečnost provozu distribuční sítě je správné určení poruchového stavu, jeho lokalizace a odstranění.

Pro určení zemního spojení se používá řada metod, které se dělí na aktivní a pasivní, pasivní metody se dále dělí na metody pracující s přechodovým dějem poruchy a nebo s ustáleným stavem. Dále se pak využívá několik systémů pro určení i lokalizaci zemního spojení jako je například systém „Švédské neutrály“ nebo přizemňování fáze („Shuntování“).

Po vyhledání zemního spojení některým způsobem z uvedených metod přichází na řadu působení ochran a automatika opětného zapnutí, která zemní spojení ve většině případů odstraní. [5][6]

3.1 Aktivní metody

Aktivní metody pracují tak, že v případě zemního spojení injektují od napájecího transformátoru do sítě signál o určité frekvenci, ten se pak uzavírá přes místo poruchy do smyčky a vystopováním

signálu se určí místo zemního spojení. U vysoko-impedančního zemního spojení je metoda určení nepřesnější. Toto spojení vzniká zejména kompenzovaných sítí, kde se pro zvýšení přesnosti používá signál o rezonanční frekvenci. U nízko-impedančního zemního spojení se do vedení injektuje signál o frekvenci 70 Hz.

Aktivní metody se díky své technické náročnosti moc nepoužívají a dává se přednost jednodušším pasivním metodám. Dále jsem se tedy zabýval vysvětlením principu některých vybraných pasivních metod.

3.2 Pasivní metody

Pasivní metody určují zemní spojení díky vstupním datům z přístrojového transformátoru, kde sledují různé veličiny (netočivé složky napětí, fázová napětí, netočivé složky proudů, směr toku výkonů, atd.). Dle nich pak vyhodnocují jestli je daný vývod vedení postižený či nepostižený. Stejně jako u aktivních metod je vyhodnocování vysoko-impedančního zemního spojení složitější a nepřesnější.

3.2.1.1 Netočivé složky napětí a proudu

Pro určování postiženého vývodu se často používají netočivé složky napětí a proudu, proto jsem se rozhodl přiblížit jak se tyto složky měří a jak se mění jejich hodnoty při poruše v různých sítích.

Netočivé složky napětí a proudu se měří pomocí tří přístrojových transformátorů napětí a tří přístrojových transformátorů proudu pro každý vývod rozvodny. Výsledkem měření je tedy trojnásobek netočivé složky jedné fáze. V případě bezporuchového stavu a při uvažování symetrické sítě je součet všech netočivých složek proudu roven nule.

Pokud dojde k poruše tak se na nepostižených vývodech objeví fázový posun netočivé složky vůči napětí o úhlu menším než 90° . U postiženého vývodu závisí fázový posun netočivých složek proudu a napětí na způsobu uzemnění uzlu sítě. Pro izolovanou soustavu se objeví fázový posun netočivých složek proudu a napětí okolo 270° . Pro soustavu kompenzovanou se objeví fázový posun netočivých složek větší než 90° . U izolovaných soustav většinou není velký problém rozpoznat postižený vývod díky velkému rozdílu natočení fázorů netočivých složek, avšak u sítí kompenzovaných to může být problém, zvláště když se jedná o odporové zemní spojení. Pro lepší rozpoznání postiženého vývodu v kompenzovaných soustavách se paralelně ke zhašející tlumivce připojí odporník. Ten má za důsledek navýšení činné složky netočivého proudu u postiženého vývodu a tím naroste i celková

velikost netočivé složky proudu a i fázový posun netočivých složek proudu a napětí je znatelnější. Připojením odporníku tedy dojde k usnadnění určení postiženého vývodu.

3.2.2 Pasivní metody pracujících s ustáleným stavem

Druhy pasivních metod pracujících s ustáleným stavem: wattmetrická metoda, amplituda fázového napětí a netočivé složky napětí, porovnávání amplitudy netočivých složek proudu, porovnávání fáze netočivé složky proudu, porovnání skupin amplitud a fáze netočivých složek proudů, směr toku jalového výkonu netočivých složek, metoda maximální změny jalové složky netočivého proudu, metoda detekce činné složky netočivého proudu (činného výkonu netočivé složky), metoda páte harmonické, metoda základní harmonické, metoda vyšších harmonických, admitanční princip netočivé složky, metoda zpětné složky proudu, zbytková inkrementační metoda. [5]

Pasivní metody pracující s ustáleným stavem se používají většinou více, díky menším nárokům na rychlost vyhodnocení poruchového stavu a jeho lokalizace. Jelikož tyto metody pracují na podobných principech, podrobněji rozeberu jen některé z uvedených metod.

3.2.2.1 Amplituda fázového napětí a netočivé složky napětí

Při výskytu zemního spojení se napětí postižené fáze sníží a přenesse se na napětí uzlu. Měřením napětí uzlu nebo fázového napětí tedy zjistíme, že došlo k zemnímu spojení. Pomocí zjištěných napětí ale nelze určit postižený vývod, proto se tato metoda se používá například u wattmetrické metody jako spouštěcí stupeň pro vyhledávání místa zemního spojení.

3.2.2.2 Admitanční princip netočivé složky

U této metody se nepřetržitě sleduje netočivá složka napětí a proudu všech vedení. Při vzniku zemního spojení dojde na postiženém vývodu ke změně těchto hodnot a tím i ke změně admitance. Vedení se změnou admitance je označeno za postižené. Vlivem nesymetrie vedení však nemusí být tato změna znatelná, proto se používá přesnější metoda přírůstkové admitance. Tato metoda vypočítává admitanci z netočivého napětí a proudu před poruchou a při poruše. Je vhodná zejména pro kompenzované sítě a je jedna z nejpřesnějších.

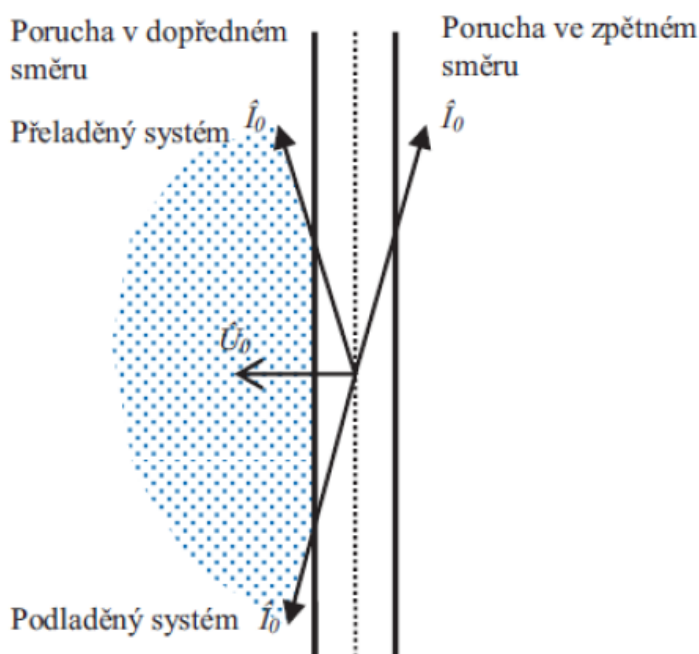
3.2.2.3 Wattmetrická metoda

Wattmetrická metoda využívá k lokalizaci poruchy netočivou složku činného poruchového proudu. Tato metoda je vhodná pro kompenzované a izolované soustavy, jelikož pracuje s činnou složkou

poruchového proudu. Tato část proudu není nikdy úplně vykompenzována a proto se díky ní dá určit postižený vývod. U postiženého vývodu je opačný směr toku proudu či výkonu a i jeho velikost je větší než u nepostiženého, tímto porovnáním se určí postižený vývod.

Přesnost metody závisí na citlivosti přístrojového transformátoru a velikosti činné složky poruchového proudu. Veliká citlivost přístrojových transformátorů může mít za následek špatné vyhodnocení poruchového stavu, proto se u této metody používá spouštěcího stupně pro detekci vzniku zemního spojení a poté se zjišťuje, kde zemní spojení vzniklo. U vysoko-impedančních poruch, kdy je velikost činné složky menší, se k zhášející tlumivce krátkodobě připojuje paralelně odporník, který rozladí obvod a určení postiženého vývodu je díky tomu přesnější.

Tato metoda se v energetice používá již mnoho let a lze říci, že jde o dobře fungující spolehlivou metodu detekce zemního spojení. Avšak u vysoko-impedančních zemních spojení může docházet ke špatnému vyhodnocení místa poruchy. Metoda je použitelná hlavně v kompenzovaných a izolovaných soustavách.



Obr. 11: Pracovní charakteristika wattmetrické metody [5]

3.2.3 Pasivní metody pracující s přechodovým dějem

Druhy pasivních metod pracujících s přechodovým dějem: metoda první půlperrody (Whisherův princip), porovnání amplitudy netočivé složky proudu, porovnání polarity netočivé složky proudu,

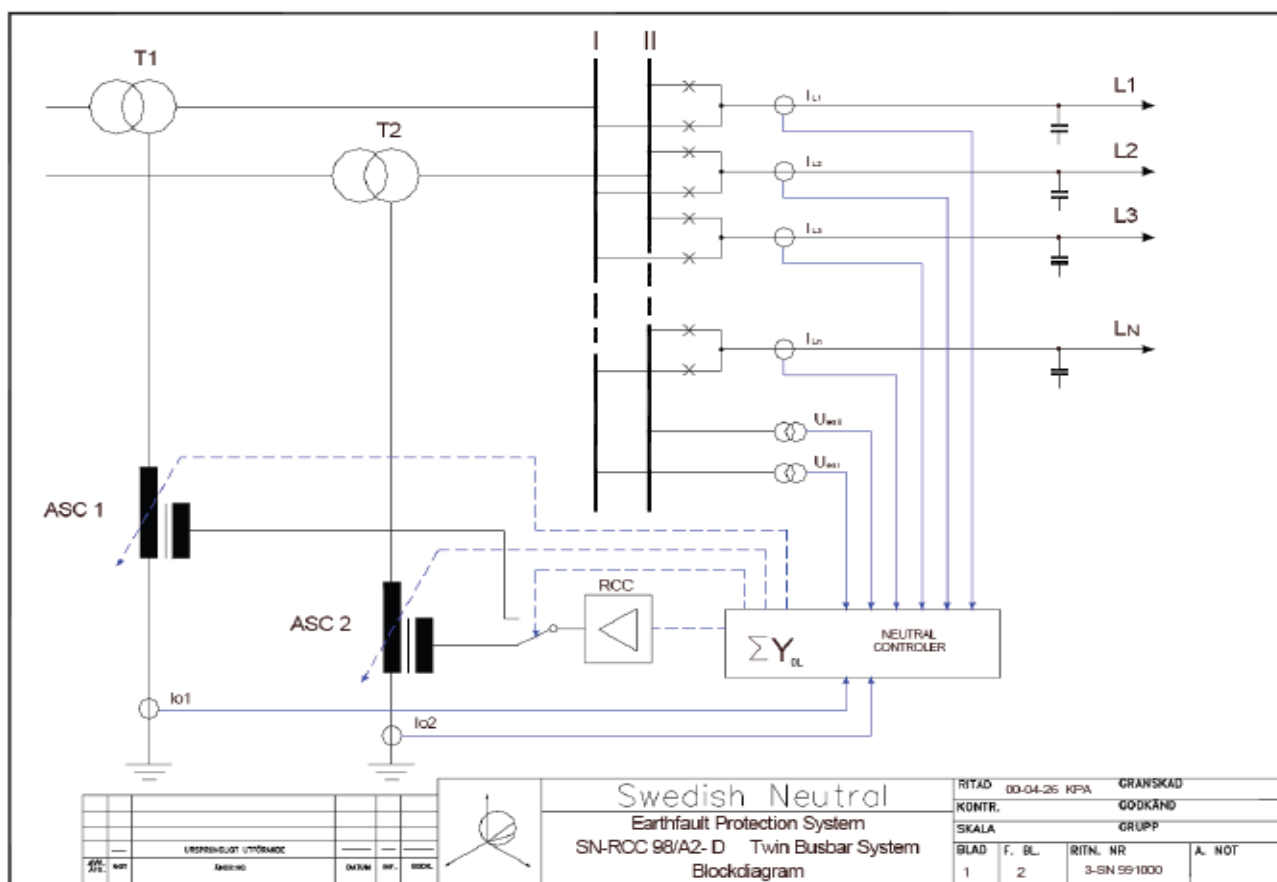
porovnání polarit jalového výkonu netočivých složek napětí a proudu, připínání odporů, metoda qu-diagramu, metoda energií, pulzní metoda. [5]

Vlivem vzniku zemního spojení nastane přechodový děj. Ten můžeme rozdělit do tří částí: vybití postižené fáze, přenabíjení nepostižených fází a vliv zhášející tlumivky. Tyto metody tedy využívají k určení postiženého vývodu směry toku proudů při vzniku zemního spojení. Vlivem zemního spojení se také začne šířit podélná vlna a některé metody se zaměřují na porovnávání odražené a přímé vlny pro určení místa poruchy. Pasivní metody pracující s přechodovým dějem jsou využívány méně, z důvodů jejich větší náročnosti na rychlost rozhodnutí o zemním spojení a jeho lokalizaci a žádné možnosti opakování měření.

3.3 Švédská neutrála

Švédská neutrála je automatický systém pro určení a lokalizaci zemního spojení a omezení poruchového proudu. Tento systém používá metodu admitančního principu netočivé složky, průběžně tedy vypočítává admitanci všech vývodů sítě a při vzniku zemního spojení porovnáním hodnot určí postižený vývod. Po určení postiženého vývodu systém automaticky doladí zhášející tlumivku dokud hodnota admitance postiženého vývodu není rovná hodnotě před vznikem zemního spojení. Důsledkem tohoto doladění klesne poruchový proud a porucha někdy sama odezní. Snížením hodnoty poruchového proudu také dojde ke snížení nebezpečného dotykového a krokového napětí v místě poruchy a tudíž k větší bezpečnosti provozu i při trvající poruše.

Na obr.12 je znázorněna rozvodna s dvojitým systémem přípojnic s automatikou švédské neutrály, kde každý vývod je sledován přístrojovými transformátory proudu a každá z přípojnic je sledována přístrojovými transformátory napětí. Tato data jsou zpracována v automatickému systému a jako výsledek je brán potom popud k přeladění zhášejících tlumivek. „V ČR je systém Swedish Neutral provozován společností ČEZ.a.s. v rozvodně Hodolany a Olomouc.“ [5]



Obr. 12: Automatika švédské neutrály pro dvojitý systém přípojníc [2]

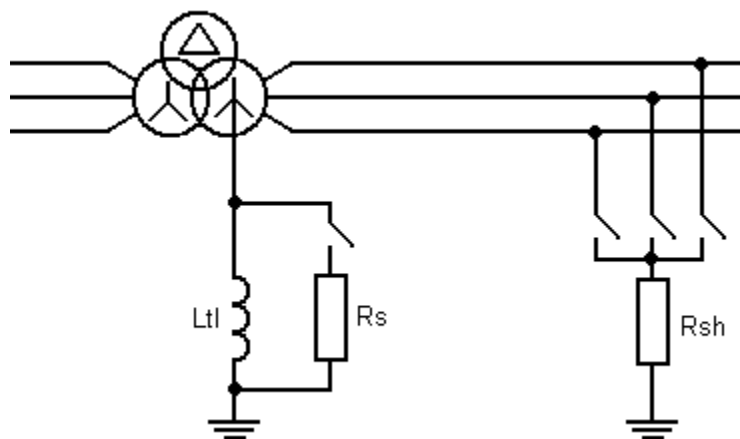
3.4 Systém přizemnění postižené fáze (Shuntování)

Další metoda která se používá je systém přizemňování fáze tzv. Shuntování. Tato metoda se používá v rozsáhlých sítích s velkými kapacitními proudy při poruše. Její hlavní příznivý účinek je při trvalém zemním spojení kdy pomocí této metody snížíme zbytkový poruchový proud postižené fáze v místě poruchy a jeho hlavní část přesuneme do rozvodny, kde se uměle vyvolá zemní spojení přizemněním postižené fáze přes rezistor či reaktor. Tímto způsobem se tedy sníží protékající proud místem poruchy a tudíž i velikost dotykového napětí. Tento systém je v poslední době velice rozvíjen. Výhodou oproti jiným systémům (například systému švédská neutrála) je jeho jednoduchost a dobrá účinnost. Tato metoda je neúčinnější pro oblouková zemní spojení, naopak pro kovový zkrat v blízkosti rozvodny již není účinná vůbec.

3.4.1 Popis funkce Shuntování

V případě vzniku zemního spojení se nejdřív zemní spojení musí vyhodnotit a pak až je omezován poruchový proud. Pro vyhodnocení poruchy se měří napětí uzlu transformátoru a napětí všech fází

všech vývodů. Pokud vzroste napětí uzlu na hodnotu 30% nebo 50% fázového napětí systém vyhodnotí že vzniklo zemní spojení. Poté se měřením napětí na fázích zjišťuje postižený vývod. Za postižený vývod je označen ten, ve kterém je zjištěn pokles napětí o úroveň minimálně $0,8 \cdot U_f$. Pokud tyto dvě podmínky trvají alespoň 5 s, automatika přizemní postiženou fázi v závislosti na použitém systému buď přes rezistor nebo reaktor. [8]



Obr. 13: principiální schéma metody shuntování [8]

3.4.1.1 Shuntování pomocí reaktoru vs. rezistoru

Provedení Shuntování může být buď s uzemněním přes rezistor nebo přes reaktor. Provedení s uzemněním přes reaktor provádí i česká firma EGE, spol. s.r.o.. Rezistor se v tomto použití používá o něco déle než reaktor. Výhody reaktoru však spočívají v jeho lepší proudové odolnosti. Reaktor od společnosti EGE vydrží průchod zkratového proudu po dobu 2 s o hodnotě 3,7 kA, zatímco rezistor od německého výrobce MAT - Dr. Becker GmbH má zkratovou odolnost o něco menší a to 2 kA po dobu 1 s. Největší rozdíl a výhodu reaktoru vidím v dovoleném trvale procházejícím proudu a ta je u reaktoru 150 A, zatím co u rezistoru je to 70 A po dobu sedmnácti minut a 25 A po dobu jedné hodiny. Naopak výhoda rezistoru oproti reaktoru je tlumí přechodové děje při vzniku zemního spojení a také je to frekvenčně nezávislý prvek. Reaktor je frekvenčně závislý a pro vyšší frekvence má vyšší reaktanci a tudíž proudy vyšších harmonických při zemním spojení budou procházet spíše místem poruchy. [8]

3.5 Ochrany

Pro většinu sítí se používá dvojitě chránění nadproudovými ochranami. První ochrana chrání vedení proti účinku poruchového proudu při zemním spojení a druhá chrání vedení proti přetížení. Ochrany vedení můžeme rozdělit do dvou skupin stupňové ochrany (časově závislé, nezávislé, směrové a

distanční) a srovnávací ochrany. Stupňové ochrany pracují s vhodným nastavením časového zpoždění a tím zajišťují selektivitu chránění. Srovnávací ochrany pracují na principu porovnávání vstupní a výstupní veličiny z chráněného objektu či úseku vedení.

3.5.1 Závislá stupňovitá ochrana

V síti je rozmístěno několik ochran směrem od zdroje k odběrateli. Každá tato ochrana má nastavenou hodnotu proudu, který nesmí být překročen. Při zemním spojení nebo při přetížení vedení proud naroste a ochrana vedení odpojí. Čím větší proud ochranou teče, tím rychleji ochrana zareaguje.

3.5.2 Nezávislá stupňovitá ochrana

Funguje stejně jako závislá stupňovitá ochrana akorát rychlost zapůsobení není závislá na procházejícím proudu. Proto není vhodná jako ochrana proti přetížení.

3.5.3 Směrová stupňovitá ochrana

Tato ochrana může být buď závislá, nezávislá a nebo distanční. Přidáním směrového členu se sleduje směr toku poruchového proudu a ochrana zapůsobí pouze při správném směru toku poruchového proudu.

3.5.4 Distanční ochrana

Tato ochrana sleduje impedanci vedení, pokud impedance vedení klesne pod nastavenou hodnotu, ochrana zapůsobí. Distanční ochrana může být doplněna o směrový článek a lze pomoci ní určit vzdálenost místa zemního spojení. Tento typ ochran se většinou používá v systému shuntování (3.4) kde se podle ní zjišťuje místo zemního spojení.

3.5.5 Srovnávací ochrana

Srovnávací ochrana měří vstupující a vystupující veličiny z chráněného objektu (transformátoru, atd.) pomocí rozdílu těchto veličin určuje, zda došlo k poruše a zda je porucha v chráněném objektu nebo mimo něj.

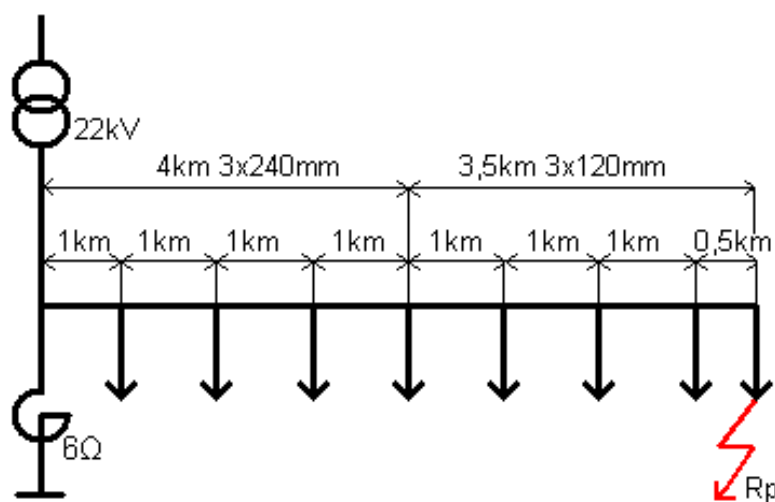
3.6 Automatika opětného zapínání

Automatika opětného zapínání je používána ve venkovních sítích a důvodem jejího použití je jednoduché odstranění přechodových zemních spojení. Pomocí chvilkového odpojení vedení od

zdroje po vzniku přechodového zemního spojení se ve většině případech obnoví elektrická pevnost izolace a po následném zapnutí již není žádná porucha na vedení. Tento cyklus odpojení a připojení vedení může být opakován vícekrát a v různých časových intervalech. Mezera mezi opětovným zapnutím může být tedy rychlá (do 1 s) nebo pomalá (až 3 minuty). Problém opětovného zapínání je, že dojde ke krátkodobému přerušení dodávky elektrické energie. Tudíž někdy může dojít ke značným ekonomickým ztrátám.

4 Konkrétní případ zemního spojení s přizemněnou fází

V posledním bodě zadání mé bakalářské práce mám uvést přínos uzemňování fáze se zemní poruchou a přínos tohoto systému k větší bezpečnosti distribuční sítě. Zadaný případ, který budu rozebírat jsem konzultoval s Ing. Františkem Žákem a jedná se o fiktivní čistě kabelovou síť s celkovou délkou 7,5 km, s osmi odběry o stejném výkonu. Přičemž na posledním odběru došlo k jednofázovému zemnímu spojení. Po zjištění zemního spojení a jeho lokalizaci je postižená fáze přizemněna přes reaktor.



Obr. 14: Schématické znázornění zadané sítě při zemní poruše

První 4 km kabelového vedení jsou 3 kabely o průřezu $1 \times 240 \text{ mm}^2$ a zbývající část vedení jsou 3 kabely o průřezu $1 \times 120 \text{ mm}^2$. Toto vedení je uložené v zemi a uložení je provedeno do trojúhelníka. Na základě těchto skutečností jsem si našel v katalogu kabelů pro vysoké napětí výrobce Draka, kabely tohoto typu 22-AXEKVCE 12,7/22 (25) kV s parametry uvedenými v tabulce 4.1.

Počet žil x průřez jádra (mm ²)	Odpor jádra max. (Ω/km)	Odpor stínění max. (Ω/km)	Indukčnost v trojúhelníku (mH/km)
1 x 120/16	0,25	1,15	0,39
1 x 240/25	0,13	0,73	0,34

Tab 4.1: vybrané parametry kabelů z katalogu Draka

4.1 Zadání konkrétního případu zemního spojení

Zadaná síť pro můj příklad je tedy čistě kabelová v provedení podle obr. 14. Nyní shrnu další parametry zadané sítě. Tento řešený úsek kabelové sítě je na napěťové hladině 22 kV. Celkový kapacitní proud celé sítě je $I_c = 450$ A po vykompenzování je tento proud $I_{zbyt} = 16 - 25$ A podle normy však může být až 10 % z I_c , tudíž 45 A.

Střední zatížení je $S_{stř} = 4,5$ MVA s účinníkem $\cos\phi = 0,92$. Přičemž při rovnoměrném rozložení zatížení na každý vývod připadá $S_{stř_{1-8}} = 0,5625$ MVA a v činném výkonu $P_{stř_{1-8}} = 0,518$ MW.

Maximální zatížení je $S_{max} = 5,3$ MVA s účinníkem $\cos\phi = 0,98$. Přičemž zatížení jednoho vývodu je $S_{max_{1-8}} = 0,6625$ MVA a pro činný výkon $P_{max_{1-8}} = 0,649$ MW.

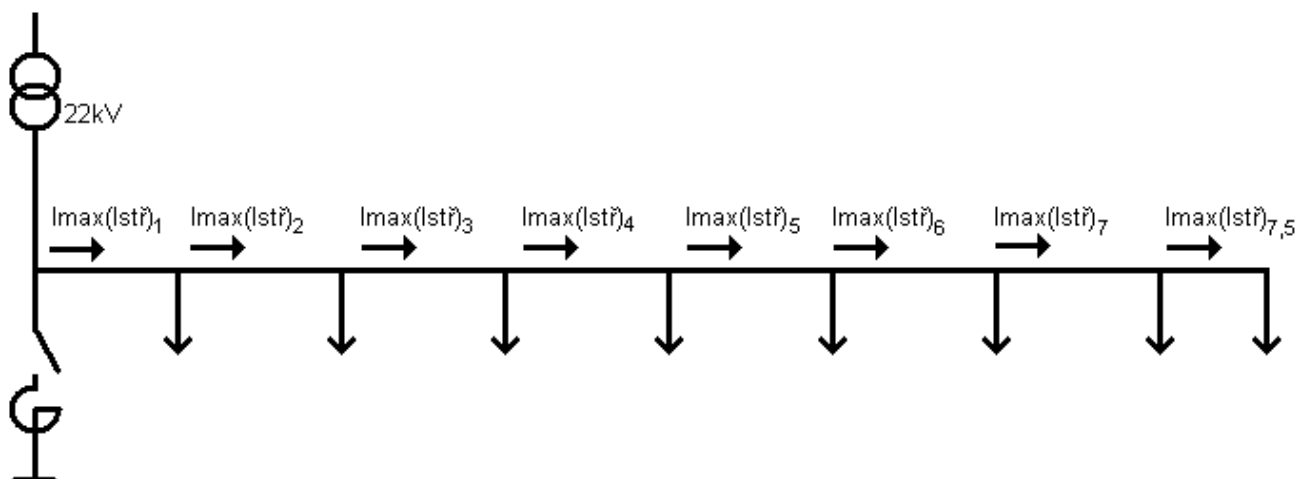
V mém případě budu řešit zemní spojení s odporem poruchy $R_p = 0-100$ Ω. Přínosem uzemnění fáze při zemní poruše by mělo být snížení dotykového napětí a poruchového proudu v místě poruchy.

4.2 Vypočtené parametry sítě

V první části jsem vypočítal impedanci kabelů, pomocí zadané délky a parametrů kabelů uvedených v tabulce 4.1. Poté jsem z těchto parametrů dopočítal proudy, procházející za jednotlivými odběry. A z nich určil úbytky napětí a celkový úbytek. Tyto výsledky jsem naznačil v tabulce 4.2 a obrázku 15.

délka (km)	R (Ω)	X (Ω)	Z (Ω)	úhel (°)	Pmax (MW)	Pstř (MW)	I _{max} (A)	I _{stř} (A)
1	0,107	0,107	0,151	45,000	5,194	4,140	139,089	118,094
2	0,213	0,214	0,302	45,134	4,545	3,623	121,703	103,333
3	0,320	0,320	0,453	45,000	3,896	3,105	104,317	88,571
4	0,427	0,427	0,604	45,000	3,246	2,588	86,931	73,809
5	0,634	0,550	0,839	40,942	2,597	2,070	69,544	59,047
6	0,841	0,672	1,077	38,627	1,948	1,553	52,158	44,285
7	1,049	0,794	1,316	37,122	1,299	1,035	34,772	29,524
7,5	1,152	0,856	1,435	36,614	0,649	0,518	17,386	14,762

Tab 4.2: vypočítané parametry sítě naznačené na obrázku 15



Obr. 15: velikost proudů v uvažované síti podle tabulky 4.2

Z těchto vypočítaných proudů, hodnot odporu, reaktance a účinníku $\cos\phi$ jsem si dále podle níže uvedeného vztahu dopočítal úbytky napětí na jednotlivých částech vedení a také celkový úbytek napětí.

$$\Delta U\% = \frac{100 * P * l (R + X * \operatorname{tg}\phi)}{U^2} \quad (\%)$$

$$\Delta U = \frac{U_S * \sqrt{3} * \Delta U\%}{100} \quad (\text{V})$$

délka (km)	$\Delta U\%_{\max}$ (%)	$\Delta U\%_{\text{stř}}$ (%)	ΔU_{\max} (V)	$\Delta U_{\text{stř}}$ (V)
1	0,138	0,110	52,478	41,829
2	0,121	0,096	45,918	36,600
3	0,103	0,082	39,359	31,372
4	0,086	0,069	32,799	26,143
5	0,125	0,099	47,483	37,848
6	0,093	0,074	35,612	28,386
7	0,062	0,050	23,742	18,924
7,5	0,029	0,024	11,235	8,955
celkem	0,757	0,604	288,627	230,057

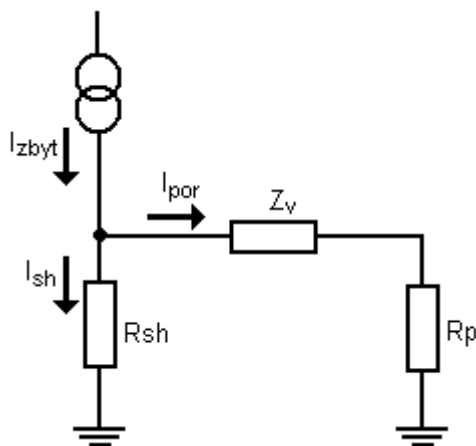
Tab 4.3: vypočítané úbytky napětí

Vzhledem k velkým průřezům vedení je celkový úbytek napětí na vedení velice nízký a nedosahuje úrovně ani jednoho procenta.

4.3 Omezení proudu poruchou pomocí shuntování

V další části příkladu budu řešit omezení zbytkového proudu pomocí shuntování. Uvedu zde proudové poměry v místě poruchy a v místě přizemnění fáze (v rozvodně) v závislosti na odporu poruchy R_p . A vypočítám dotykové napětí, které vznikne v důsledku průchodu těchto proudů.

V důsledku přizemnění postižené fáze po lokalizaci zemního spojení se zbytkový proud rozdělí. Jedna část tohoto proudu bude protékat místem poruchy a druhá místem přizemnění (v rozvodně).



Obr. 16: stav při uvažování shuntování

Výpočet proudu v rozvodně:

$$I_{sh} = I_{zbyt} \frac{(Z_V + R_P)}{(Z_V + R_P + R_{Sh})}$$

Výpočet proudu v místě poruchy:

$$I_{por} = I_{zbyt} \frac{(R_{Sh})}{(Z_V + R_P + R_{Sh})}$$

Výpočet dotykového napětí v rozvodně:

$$U_{dot\ sh} = I_{sh} * R_{sh}$$

Výpočet dotykového napětí v místě poruchy:

$$U_{dot} = I_{sh} * (Z_V + R_P)$$

Z uvedených vztahů jsem vypočítal procházející proudy pro různé hodnoty odporů poruchy ($R_p = 0 - 100 \Omega$) a různé hodnoty poruchových proudů ($I_{zbyt} = 16, 25$ a 45 A). Ty jsem uvedl

v následujících tabulkách. Dotykové napětí je v rozvodně i v místě poruchy vždy stejné, proto je uvedena pouze jedna hodnota.

R_p (Ω)	I_{sh} (A)	úhel ($^\circ$)	I_{por} (A)	úhel ($^\circ$)	Udot (V)	úhel ($^\circ$)
0	0,497	29,789	2,080	-6,825	2,985	29,789
1	0,786	15,697	2,036	-5,994	4,715	15,697
2	1,085	9,851	1,993	-5,343	6,511	9,851
5	1,943	3,892	1,876	-4,029	11,655	3,892
7	2,467	2,533	1,806	-3,461	14,803	2,533
10	3,187	1,532	1,709	-2,857	19,120	1,532
20	5,120	0,512	1,451	-1,806	30,718	0,512
45	8,102	0,122	1,053	-0,940	48,613	0,122
70	9,802	0,000	0,826	-0,689	58,810	0,000
100	11,074	0,000	0,657	-0,484	66,443	0,000

Tab.4.4: hodnoty protékajících proudů a dotykového napětí při uvažovaném $I_{zbyt} = 16$ A

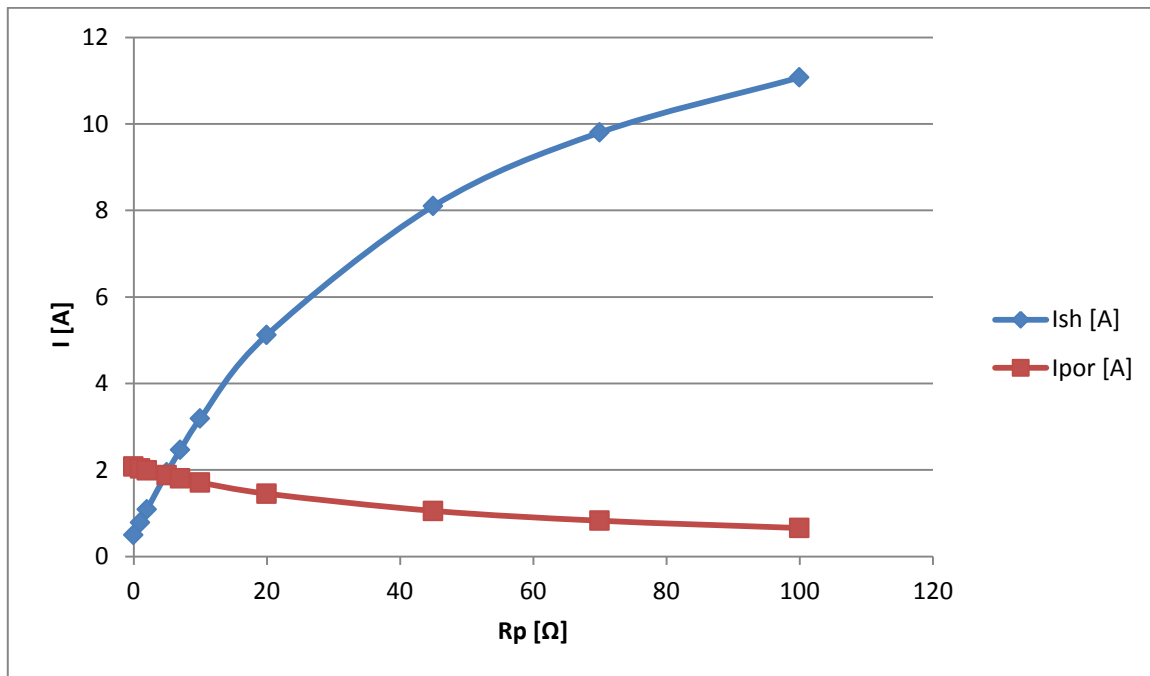
R_p (Ω)	I_{sh} (A)	úhel ($^\circ$)	I_{por} (A)	úhel ($^\circ$)	Udot (V)	úhel ($^\circ$)
0	0,777	29,789	3,250	-6,825	4,664	29,789
1	1,228	15,697	3,181	-5,994	7,366	15,697
2	1,695	9,851	3,115	-5,343	10,173	9,851
5	3,035	3,892	2,932	-4,029	18,212	3,892
7	3,855	2,533	2,822	-3,461	23,129	2,533
10	4,979	1,532	2,671	-2,857	29,875	1,532
20	8,000	0,512	2,267	-1,806	47,998	0,512
45	12,660	0,122	1,646	-0,940	75,958	0,122
70	15,315	0,000	1,291	-0,689	91,891	0,000
100	17,303	0,000	1,026	-0,484	103,817	0,000

Tab.4.5: hodnoty protékajících proudů a dotykového napětí při uvažovaném $I_{zbyt} = 25$ A

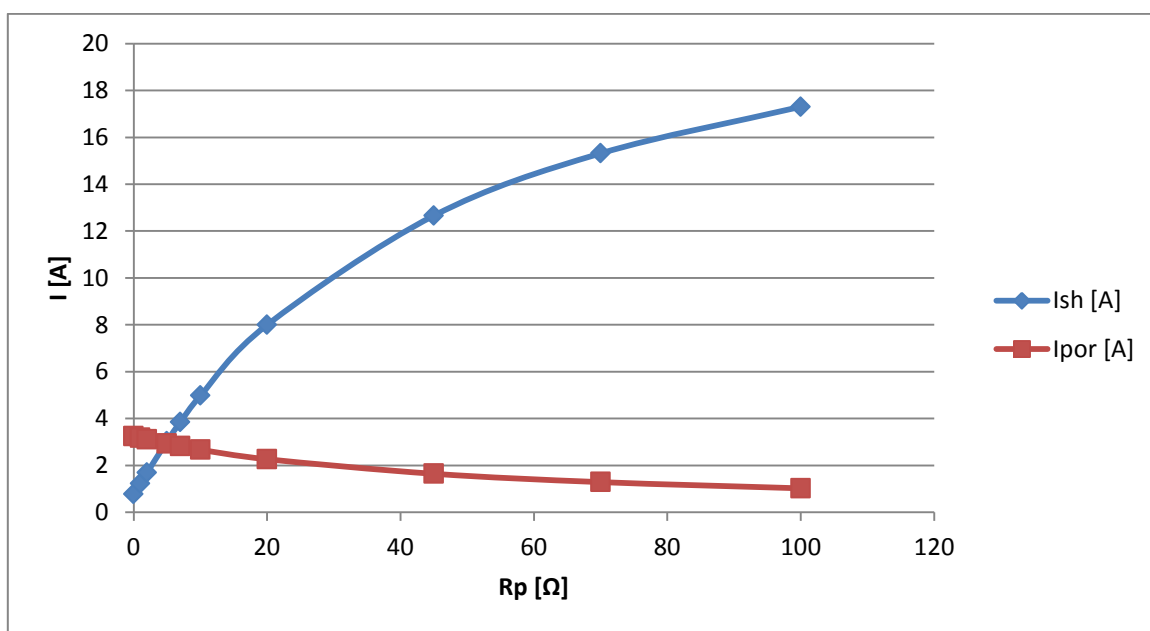
R_p (Ω)	I_{sh} (A)	úhel ($^\circ$)	I_{por} (A)	úhel ($^\circ$)	Udot (V)	úhel ($^\circ$)
0	1,399	29,789	5,849	-6,825	8,395	29,789
1	2,210	15,697	5,725	-5,994	13,260	15,697
2	3,052	9,851	5,606	-5,343	18,311	9,851
5	5,463	3,892	5,278	-4,029	32,781	3,892
7	6,939	2,533	5,079	-3,461	41,633	2,533
10	8,962	1,532	4,808	-2,857	53,775	1,532

20	14,399	0,512	4,081	-1,806	86,396	0,512
45	22,787	0,122	2,962	-0,940	136,724	0,122
70	27,567	0,000	2,324	-0,689	165,403	0,000
100	31,145	0,000	1,847	-0,484	186,871	0,000

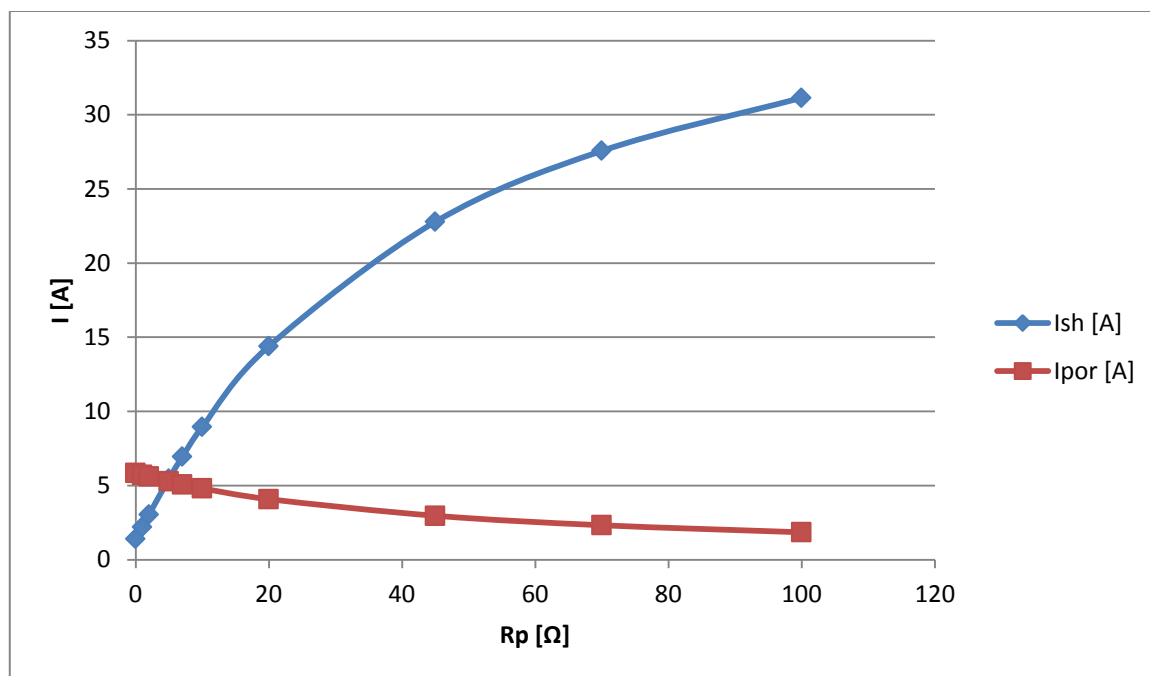
Tab.4.6: hodnoty protékajících proudů a dotykového napětí při uvažovaném $I_{zbyt} = 45 \text{ A}$



Graf 1: hodnoty poruchových proudů za tab 4.4 při uvažovaném $I_{zbyt} = 16 \text{ A}$



Graf 2: hodnoty poruchových proudů za tab 4.5 při uvažovaném $I_{zbyt} = 25 \text{ A}$



Graf 3: hodnoty poruchových proudů za tab 4.6 při uvažovaném Izbyt = 45 A

Z tabulek (4.4, 4.5, 4.6) a grafů (1,2,3) lze vidět výrazné omezení zbytkového proudu procházejícím poruchou zejména u víceohmového zemního spojení. U kovového zemního spojení (odpor pouze jednotky Ω) je zbytkový proud omezen pouze nepatrně. Pro odpor poruchy Rp = 20 Ω je již vidět ve všech případech značné omezení zbytkového proudu v místě poruchy a převedení jeho největší části do rozvodny.

4.4 Dotykové napětí bez přizemnění postižené fáze

V případě, že při vzniku zemního spojení nedojde k přizemnění postižené fáze, by se poruchový proud nerozdělil a procházel by celý místem poruchy. V takovémto případě by napěťové poměry vycházely ze vztahu.

Výpočet dotykového napětí v místě poruchy bez přizemnění fáze:

$$U_{dot} = I_{por} * (Z_V + R_p)$$

Rp (Ω)	Udot (I45) (V)	úhel	Udot (I25) (V)	úhel	Udot (I16) (V)	úhel
0	64,585	36,614	35,880	36,614	22,963	36,614
1	104,220	21,691	57,900	21,691	37,056	21,691
2	146,977	15,194	81,654	15,194	52,259	15,194

5	279,507	7,921	155,282	7,921	99,380	7,921
7	368,857	5,994	204,920	5,994	131,149	5,994
10	503,316	4,389	279,620	4,389	178,957	4,389
20	952,619	2,317	529,233	2,317	338,709	2,317
45	2077,197	1,062	1153,998	1,062	738,559	1,062
70	3202,072	0,689	1778,929	0,689	1138,514	0,689
100	4552,003	0,484	2528,891	0,484	1618,490	0,484

Tab. 4.7 vypočítaná dotyková napětí pro různé hodnoty zbytkových proudů

Z vypočítaných hodnot je zcela zřejmý přínos přizemnění fáze z hlediska omezení zbytkového proudu, protékajícím poruchou a také z hlediska omezení dotykového napětí. Například při uvažování zbytkového proudu ($I_{zbyt} = 25 \text{ A}$) se hodnota dotykového napětí při odporu poruchy $R_p = 20 \text{ } \Omega$ snížila z $U_{dot} = 338,7 \text{ V}$ na $U_{dot} = 48 \text{ V}$. Tento omezující trend lze pozorovat u všech uvažovaných hodnot odporu poruchy ($R_p = 0\text{-}100 \text{ } \Omega$) a pro všechny uvažované zbytkové proudy ($I_{zbyt} = 16, 25, 45 \text{ A}$). K největšímu omezení dotykového napětí a tudíž i k největšímu přínosu metody Shuntování dochází při vyšších hodnotách odporu poruchy R_p .

5 Závěr

V mé bakalářské práci s názvem „systémy s uzemňováním fáze se zemní poruchou“ jsem nejprve uvedl rozdělení distribuční sítě ČR podle napěťových hladin a uvedl jsem typické způsoby uzemnění uzlu transformátoru pro uvedené napěťové hladiny. Jelikož je nejčastější poruchou v distribučních sítích zemní spojení, rozhodl jsem se podrobněji popsat proudové a napěťové poměry při zemním spojení s ohledem na způsob uzemnění uzlu transformátoru. A to pro uzel izolovaný, uzemněný přes zhášecí tlumivku a uzemněný přes odporník. Zejména jsem kladl důraz na poruchový proud a vliv uzemnění uzlu transformátoru na jeho hodnotu či omezení. Protože právě velký poruchový proud je jedním z největších problémů provozování distribuční sítě při trvajícím zemním spojení. Důsledkem procházení poruchového proudu zemním spojením dochází ke vzniku dotykového napětí, které při velkých hodnotách poruchového proudu může být nebezpečné. Na základě těchto poznatků jsem dále uvedl normu pro dovolené dotykové napětí.

Dále jsem se zabýval popisem různých systémů na zjišťování a lokalizaci zemního spojení a ve stručnosti jsem uvedl typy používaných ochran. Systémy pro vyhledání zemního spojení jsem rozdělil do skupin podle jejich principu a některé jsem rozebral detailněji. Zejména jsem se zabýval

Wattmetrickou metodou, metodou Švédské neutrály a metodou Shuntování. Wattmetrická metoda je dlouho používaná a osvědčená metoda, ale na rozdíl od metody Švédské neutrály či Shuntování nijak neomezuje zbytkový proud zemního spojení. Metoda Švédské neutrály a metoda Shuntování mají velkou výhodu právě v dovednosti omezení zbytkového proudu, který je z důvodu bezpečnosti při provozu s trvalým zemním spojení u rozsáhlých distribučních sítí velkým problémem.

Metoda Švédské neutrály k omezení zbytkového proudu používá složitý systém, který spočívá v neustálém měření admitance sítě. Při vzniku zemního spojení se admitance zpět dorovná na původní hodnotu pomocí automatického doladění zhášející tlumivky. Tento systém je na rozdíl od metody Shuntování velice složitý a díky patentovým právům jej provádí pouze jedna firma. Poslední detailněji rozebíranou metodou jsem zvolil metodu Shuntování. Tato metoda provádí lokalizaci zemního spojení pomocí distančních ochran, po lokalizaci zemního spojení přichází omezení zbytkového proudu zemního spojení. Omezení tohoto proudu se provádí pomocí přizemnění postižené fáze. Toto přizemnění omezí zbytkový proud v místě poruchy a převede jeho podstatnou část do rozvodny, kde již není tolik nebezpečný. Kvalita omezení zbytkového proudu závisí zejména na poměru odporu přizemnění a odporu poruchy a vzdálenosti místa poruchy od rozvodny. Například při vzdáleném obloukovém zemním spojení je tato metoda nejúčinnější, avšak při kovovém zkratu blízko rozvodny je její příznivý vliv na omezení zbytkového proudu minimální.

Na základě těchto poznatků jsem se rozhodl ukázat příznivý dopad metody Shuntování na případě rozsáhlé distribuční sítě při vzniku jednofázového zemního spojení. Tento případ jsem konzultoval s Ing. Františkem Žákem. Pro zadanou síť jsem si vypočítal některé udávající hodnoty, například proudy v jednotlivých odběrech, proudy v jednotlivých částech vedení a úbytky napětí. Dále jsem pak uvažoval zemní spojení na této síti a vypočítal zbytkové proudy zemního spojení v místě poruchy a v rozvodně. Tyto proudy jsem vypočítal pro různé hodnoty odporu poruchy a pro tři stavy vyladění zhášející tlumivky. Z vypočítaných hodnot a grafů je zřejmý přínos metody v omezení zbytkového proudu v místě zemního spojení. Také je vidět závislost omezení zbytkového proudu s ohledem na velikost odporu poruchy, což se shoduje s teoretickými předpoklady uvedenými v kapitole 3.4 a [8]. Podle mých výsledků k citelnému omezení zbytkového proudu v místě poruchy dochází již při odporu poruchy R_p několik ohmů (cca 15Ω). Omezení je však závislé také na vzdálenosti poruchy od rozvodny. Při vzdálenějším zemním spojení by ke znatelnému omezení poruchového proudu docházelo již při nižší hodnotě odporu poruchy R_p .

6 Použitá literatura

- [1] Doc. Ing. Konstantin Schejbal CSc., Doc. Ing. Jiřina Mertlová CSc., Elektroenergetika II 1.část, Plzeň, 1998.
- [2] Petr Toman, Jiří Drápela, Stanislav Mišák, Jaroslava Orságová, Martin Paar, David Topolánek a kol., Provoz distribučních soustav, Praha, 2011.
- [3] doc. Ing. Zdeněk Fejt, CSc., Ing. Jaroslav Čermák, CSc., Elektroenergetika, Praha, 1989
- [4] Jaromír Tyrbach, Zemní spojení v třífázových soustavách, Dostupné na World Wide Web: <http://www.powerwiki.cz/attach/ES/ZemniSpojeni.pdf>
- [5] Ing. Drahomír Pernica, Nekontaktní indikátory poruchových stavů na vedení VN, Brno, 2011
- [6] Bc. Petra Vokálová, Rozbor napěťových a proudových poměrů v sítích VN, Plzeň, 2012
- [7] Václav Macháček, Dotyková napětí v distribučních sítích VN, Praha, 2010
- [8] Ing. Daniel Kouba, Analýza bezpečného provozu kompenzované sítě VN velkého rozsahu, Plzeň, 2013
- [9] Norma ČSN EN 50522: Uzemňování elektrických instalací AC nad 1 kV. 2011